

鄂西宜昌地区下古生界五峰组-龙马溪组页岩气储层发育特征与勘探潜力

蔡全升^{1,2}, 陈孝红², 张国涛², 张保民², 韩京³, 陈琳², 李培军², 李炎桂⁴

(1. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 434025;

3. 中国石化 勘探分公司 勘探研究院, 四川成都 610041; 4. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要:近年来,鄂西宜昌地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩气勘探取得了一系列重要发现和突破。为进一步明确该区五峰组-龙马溪组页岩气勘探潜力,文章在前人研究的基础上,利用钻井及野外露头资料,结合地震、测井和分析测试数据,对宜昌地区五峰组-龙马溪组页岩气储层发育特征、优质储层分布及勘探潜力等进行了深入研究。结果表明,宜昌地区五峰组-龙马溪组下部黑色富有机质页岩储层岩石类型丰富,普遍具有高硅(石英平均含量>50%)、高碳(TOC 平均为2.47%)、高成熟度(R_o 普遍大于2%)、低孔(普遍低于5%)和特低渗(平均为 $0.19 \times 10^{-3} \mu m^2$)特征,储层含气性较好,平均含气量超过 $2.0 m^3/t$ 。优质储层主要集中在五峰组和龙马溪组黑色页岩下部,对应于凯迪阶WF2-WF3笔石带和鲁丹阶LM2-LM3笔石带,厚度约11 m,与四川焦石坝和长宁地区相比,该区优质储层厚度偏薄。最后通过保存条件和经济性评价分析,认为鄂西宜昌东部斜坡区五峰组-龙马溪组页岩气保存条件相对较好,埋藏较浅,地质资源量超过 $1\ 200 \times 10^8 m^3$,具有良好的勘探潜力。

关键词:勘探潜力;页岩气;储层特征;五峰组;龙马溪组;宜昌地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and exploration potential of the Wufeng-Longmaxi shale gas reservoirs of Lower Paleozoic in Yichang area, western Hubei Province, China

Cai Quansheng^{1,2}, Chen Xiaohong², Zhang Guotao², Zhang Baomin², Han Jing³, Chen Lin², Li Peijun², Li Yangui⁴

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Wuhan, Hubei 434025, China; 3. Research Institute of SINOPEC Petroleum Exploration Branch Company Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China; 4. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: During the past few years, several shale gas discoveries were made in the Upper Ordovician Wufeng Formation and Lower Silurian Longmaxi Formation in Yichang of western Hubei Province, China. The shale gas potential of the formations was then explored by combining the previous studies with updated analyses of drilling data and outcrops, geophysical information and testing results. A summary of the development characteristics, reservoir distribution and resource potential of the formations shows that the targeted dark, organic-rich rocks at the lower part of the formations have high quartz content (more than 50% on average) and TOC (2.47% on average), and high maturity (R_o of more than 2% in general), low porosity (less than 5% in general), extra-low permeability ($0.19 \times 10^{-3} \mu m^2$ on average), and relatively high gas content ($2.0 m^3/t$ on average). Quality reservoirs are mostly distributed in the lower part (about 11 m thick) of the black rocks and can be corresponded to the WF2-WF3 Katian graptolite zone and LM2-LM3 Rhuddanian graptolite zone. The reservoirs are thinner than high-quality reservoirs in Jiaoshiaba and Changning areas, Sichuan Province. However, judging by their preservation conditions and economy, we propose that the rocks in the slope of eastern Yichang with their shallower burial depth, relatively better preservation conditions as well as a geological reserve of over $1\ 200 \times 10^8 m^3$, are worthy of further exploration.

收稿日期:2019-05-22;修订日期:2020-12-16。

第一作者简介:蔡全升(1988—),男,博士、助理研究员,沉积地质学。E-mail:cqsh0713@163.com。

通讯作者简介:陈孝红(1964—),男,研究员,沉积地质学与古生物学。E-mail:ycxiaohong@163.com。

基金项目:中国地质调查局项目(DD20179615);国家科技重大专项(2016ZX05034001-002);湖北省自然科学基金项目(2018CFB330)。

Key words: exploration potential, shale gas, reservoir characteristics, Wufeng Formation, Longmaxi Formation, Yichang area

南方下古生界五峰组-龙马溪组黑色富有机质页岩具有分布广、厚度大、有机碳含量高的特征,是中国海相页岩气勘探的重要目的层^[1-6]。近年来,针对这一主力层系的页岩气勘探工作取得了一系列重大突破,人们先后在四川盆地涪陵、长宁、威远等地发现了多个页岩气田,并实现了商业化开发,上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组作为主力产气层显示出了巨大的勘探潜力^[7-10]。然而,除四川盆地外,针对南方其它地区的五峰组-龙马溪组页岩气勘探工作却一直未取得重要进展,能否在四川盆地之外再发现新的大型页岩气田成为了人们关注的焦点^[11-12]。为了尽快取得新突破,寻找新的接替区,实现盆内页岩气勘探向盆外页岩气勘探的战略转移,自2014年开始中国地质调查局武汉地质调查中心围绕中南地区部署实施了大量页岩气基础地质调查工作。根据区域地质认识,结合大量分析测试资料,通过对比优选,选择黄陵背斜东南缘宜昌地区作为最有利勘探目标,部署实施了鄂宜页2井、鄂宜页3井,并取得了重大突破。鄂宜页2井对上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组黑色页岩500 m水平段进行压裂,获得日产 $3.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的工业气流,表明四川盆地之外的宜昌地区五峰组-龙马溪组同样具有良好的页岩气勘探前景^[13]。

然而,与涪陵焦石坝和长宁-威远相比,宜昌地区

五峰组-龙马溪组富有机质页岩储层特征及规模均存在显著差异,这就必然决定了它们的页岩气勘探潜力有所不同^[11,13-14]。因此,进一步明确五峰组-龙马溪组页岩储层发育特征对于准确评价宜昌地区页岩气勘探潜力具有十分重要的意义。为此,本文在前人研究的基础上,利用野外露头资料、钻测井资料及地震资料,并结合大量的实验测试数据,对鄂西宜昌地区五峰组-龙马溪组储层发育特征进行了深入研究,总结了优质储层分布规律,并客观评价了黄陵隆起东部宜昌斜坡区志留系页岩气勘探潜力,以期为加快该区页岩气勘探开发提供参考。

1 区域地质概况

研究区主要位于湖北宜昌境内,行政区域包括夷陵、当阳以及远安等地区。构造上属于中扬子西部,毗邻四川盆地,为黄陵背斜与荆当盆地连接的过渡带,其内部断裂发育程度相对较弱,构造较为简单,属于相对稳定的单斜构造区^[15-17]。受黄陵隆升导致的差异剥蚀作用影响,研究区靠近黄陵背斜地带自西向东依次出露了前寒武南华纪-早古生代志留纪全部地层(图1a),是中国前寒武纪和早古生代地层出露最完整、最连续的地区之一。随着斜坡区向荆当盆地方向延伸,

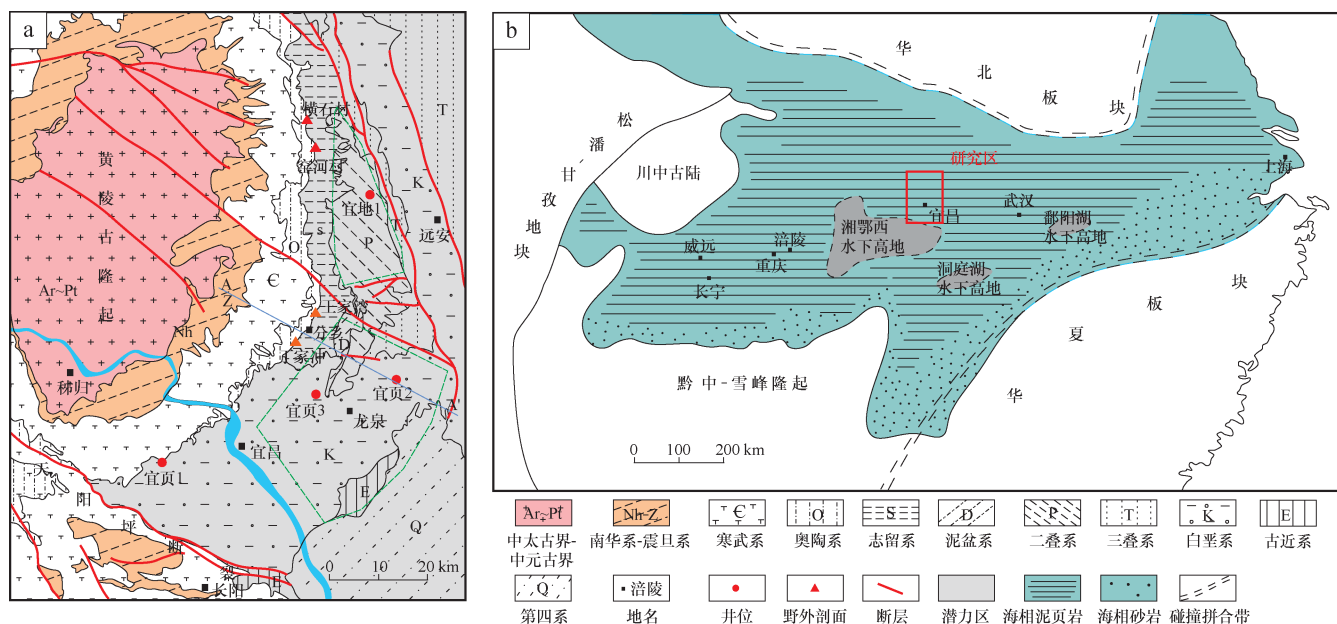


图1 宜昌地区地质特征及晚奥陶世一早志留世古地理位置(图1b据Chen et al., 2004修改)

Fig. 1 Geological features and paleogeographic location of the Yichang area during the Late Ordovician to

Early Silurian (Fig. 1b modified from Chen et al., 2004)

上部被三叠纪-白垩纪地层所覆盖,导致下部地层受剥蚀作用影响较弱,且上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组保存条件相对较好^[17]。因此,该区也是目前我国南方页岩气勘探的热点区域。

前人研究表明,晚奥陶世受加里东运动的影响,在华南东部挤压应力的持续作用下,扬子板块与华夏板块汇聚作用不断增强,导致江南-雪峰、黔中以及川中地区持续隆升^[18-19],使得在晚奥陶世一早志留世早期扬子地台沉积环境由台地相转为陆棚相,成为被几个古陆所围限的隆后滞留盆地^[20-21](图 1b)。该时期黑色页岩连片叠置发育,但由于扬子海内部发育多个水下隆起,导致区域上五峰组-龙马溪组黑色页岩岩相及厚度分布差异较大^[22-23]。本文研究区宜昌地区位于晚奥陶世一早志留世的扬子海盆内部,毗邻湘鄂水下古隆起(图 1b)。钻井资料显示该区黑色富有有机质页岩厚度约 20 m,相对四川长宁-威远、重庆涪陵等地区,尽管不同笔石带内的页岩厚度差异较大且总厚度偏薄,但黑色页岩的有机质含量同样较高(图 2)。因此,适中的厚度、较高的 TOC 预示着该区五峰-龙马溪组黑色页岩也应具备一定的勘探潜力。

2 研究及测试方法

研究资料显示,宜昌地区五峰组-龙马溪组页岩气有利含气层段主要集中在五峰组-龙马溪组下部黑色页岩层段,不同层段的储层非均质性较强^[23-24]。为了更好的客观分析这些含气层段的储层特征,以笔石带为对比标志,首先划分出野外露头 and 钻井岩心中的黑色页岩层所对应的地层单元:凯迪阶(WF1-WF3)、赫南特阶(WF4-LM1)、鲁丹阶(LM2-LM5)以及埃隆阶(LM6-LM8)(陈旭等,2015)。进而对不同页岩层段开展了全面的样品采集与分析测试。测试分析手段包括全岩及粘土矿物 X 衍射分析、孔隙度与渗透率测定、扫描电镜分析、薄片鉴定、含气性测试、有机碳测定与元素分析等。其中全岩及粘土矿物 X 衍射分析样品由中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,孔隙度与渗透率测定及扫描电镜分析由数岩科技通标标准技术服务有限公司矿产实验室测试完成,有机碳与元素分析样品由国土资源部中南矿产资源监督检测中心完成,含气性测试由中石化江汉工程公司现场解析测定。

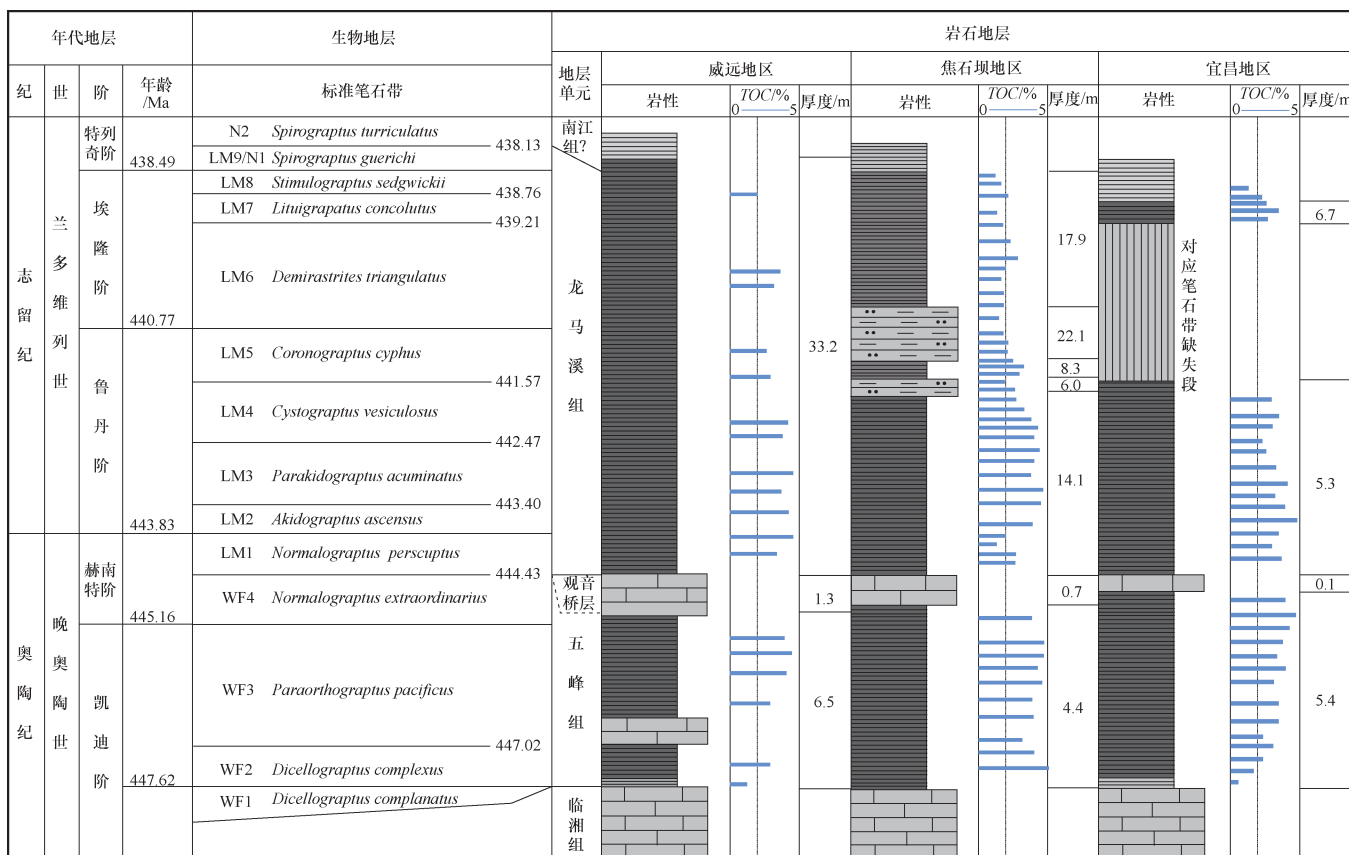


图 2 宜昌地区与四川盆地五峰组-龙马溪组黑色页岩发育层段地层综合对比

Fig. 2 Stratigraphic comparison between the black shales of Wufeng-Longmaxi Formations, Yichang area and Sichuan Basin

3 页岩气储层特征

3.1 岩性特征

在页岩气勘探与开发中,“页岩”一词已经脱离的原有的沉积学定义,不再单纯是一个岩性术语,而更多的是黑色岩系多种岩性系列的统称^[6,25]。因此,我们通常所说的页岩气储层实际上包含了多种沉积学上的岩石类型,如粘土岩、粉细砂岩、硅岩以及碳酸盐岩等,而正确识别划分岩石类型对于储层特征研究具有重要意义^[26]。

野外剖面与岩心观察发现,宜昌地区五峰组-龙马溪组下部黑色页岩层系有多种岩石类型,如泥岩、页岩、硅质泥岩、硅质页岩、砂质泥岩、砂质页岩、含粉砂泥岩、含钙质泥岩、硅质岩、泥灰岩、斑脱岩等等。为了更好地突出岩性差异和开展对比研究,参照重庆涪陵地区岩相划分方案并结合研究区的主体岩性特征,对主要岩石类型进行了归类,共划分出了粘土泥/页岩、粉砂质泥/页岩、硅质泥/页岩、硅岩、介壳泥灰岩、斑脱岩六大类,它们在野外露头及镜下均有显著的岩性差异特征(图3,图4)。



图3 宜昌地区五峰组-龙马溪组黑色页岩层系典型岩性照片

Fig. 3 Typical lithological photos of black shale from Wufeng-Longmaxi Formations in Yichang area

a. 黑色粘土页岩,页理极为发育,部分风化后成褐色,质软,五峰组,黄花丁家坡剖面;b. 黑色硅质泥/页岩,污手,页理发育程度较弱,龙马溪组,荷花横石村剖面;c. 黑色硅岩,硬度大,岩心常呈碎块,埋深2 717.91 m,五峰组,鄂宜页2井;d. 灰黑色粉砂质泥岩,见少量笔石化石,埋深1 421.7 m,龙马溪组,鄂宜页3井;e. 深灰色介壳泥灰岩,见大量腕足化石,埋深2 714.06 m,五峰组观音桥段,鄂宜页2井;f. 灰白色极薄层斑脱岩,出现频次高,五峰组,黄花丁家坡剖面

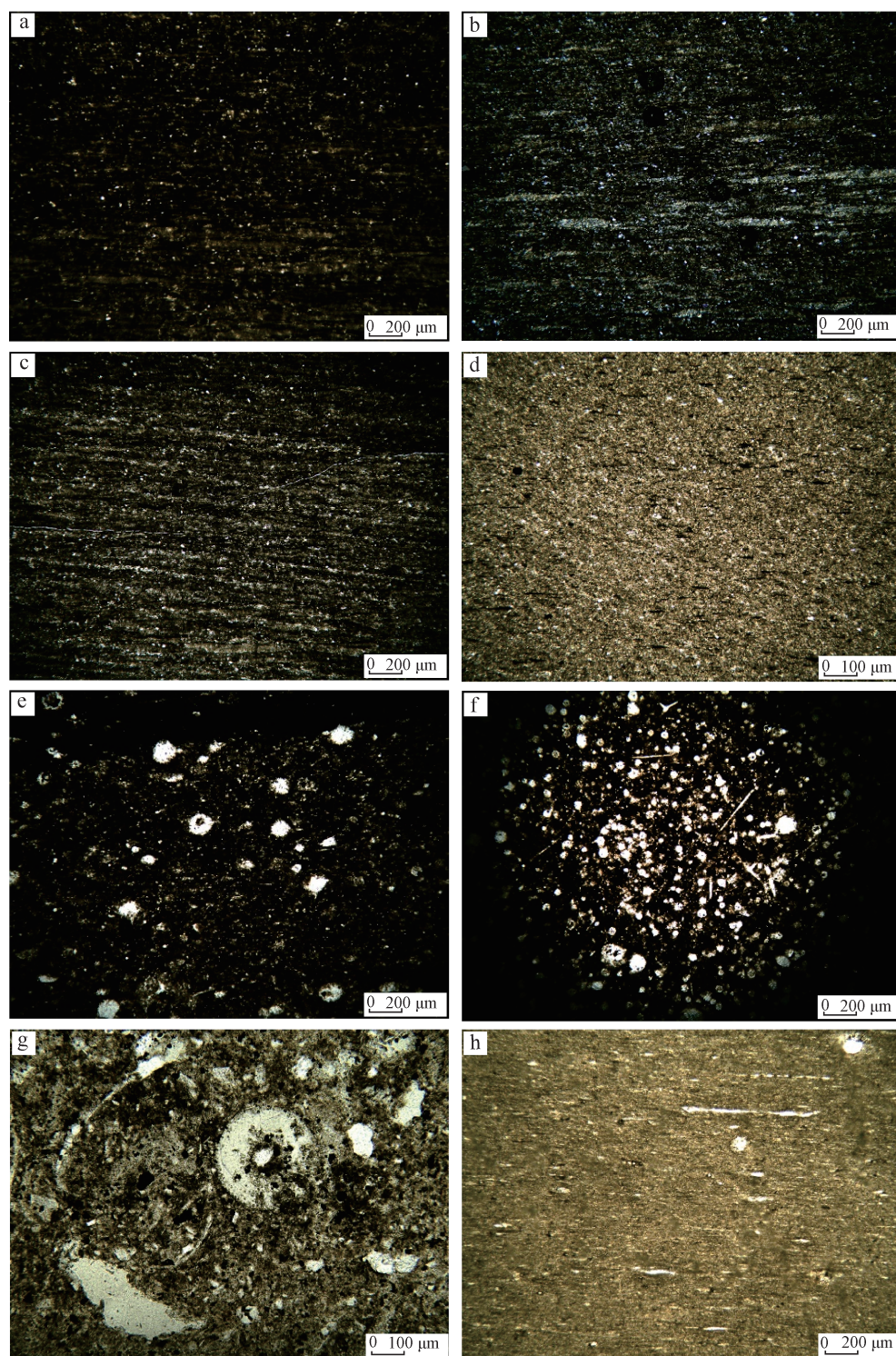


图4 宜昌地区五峰组-龙马溪组黑色岩系主要岩性镜下特征

Fig. 4 Microscopic features of the black shale from Wufeng-Longmaxi Formations in Yichang area

a. 粘土泥岩,纹层欠发育,有机质含量丰富,见极少量碎屑石英颗粒,龙马溪组,荷花横石村剖面;b. 含少量粉砂粘土页岩,透镜状弱纹层断续分布,埋深1 422.8 m,龙马溪组,鄂宜页3井;c. 粉砂质粘土页岩,暗色有机质呈层状分布,纹层发育,1 432.31 m,龙马溪组,鄂宜页3井;d. 粉砂质泥岩,纹层较弱,黑色有机质断续分布,1 434.84 m,龙马溪组,鄂宜页3井;e. 硅质泥岩,见硅质放射虫,部分可见放射虫刺,1 448.19 m,五峰组,鄂宜页3井;f. 放射虫硅岩,见大量硅质放射虫及少量海绵骨针,部分放射虫比较完整,1 447.23 m,五峰组,鄂宜页3井;g. 生物碎屑泥岩,见腕足及藻类化石,五峰组观音桥段,分乡王家湾剖面;h. 斑脱岩,不含有机质,见少量硅质,纹层不明显,龙马溪组,黄花丁家坡剖面

3.1.1 粘土泥/页岩

该类岩石以粘土矿物为主,质软,水平层理发育(图3a)。根据纹层发育特征,该类岩石可分为非纹层状粘土泥/页岩和弱纹层状粘土泥/页岩,其中非纹层状粘土泥/页岩粉砂含量低,镜下多呈现均一特点(图4a)。弱纹层状粘土泥/页岩多表现为暗色有机质含量不均匀而形成颜色深浅不同的条带,颜色偏浅的纹层则含有粉砂质颗粒,主要为细粒的陆源石英颗粒及云母(图4b)。该类岩石发育于水体安静且相对较浅的区域。

3.1.2 粉砂质泥/页岩

该岩相粉砂质含量在25%~50%,颜色偏浅,粉砂质成分主要为陆源石英、长石,见少量云母(图3b)。陆源碎屑颗粒大小不均,分选较差,磨圆以次棱角状为主。该类岩相也可分为纹层状(图4c)和弱纹层状(图4d),砂质含量越高,纹层发育程度越弱。该岩相代表陆源碎屑供给相对充足,属于相对浅的沉积环境产物,主要出现于五峰组下部和龙马溪组黑色页岩上部。

3.1.3 硅质泥/页岩

硅质泥/页岩中硅质矿物含量在50%~75%,颜色多为黑色,硬度较大,有机质含量较高,纹层不发育(图3c)。岩石内部可见到少量碎屑颗粒,还可见到大量海绵骨针和硅质放射虫(图4e),表明硅质来源除了陆源之外还存在生物成因。该类岩相多出现于鲁丹阶中下部以及凯迪阶中上部,为相对深水环境产物。

3.1.4 硅岩

该类岩石硅质含量超过75%,多无纹层,有机质含量较高,硅质矿物以自生硅为主,可见自生石英颗粒和硅质生物碎屑,岩心中常呈碎块状(图3d)。根据颗粒结构,可划分为硅藻岩、放射虫岩和海绵骨针岩,其中放射虫硅岩最为常见(图4f)。该类岩石主要以夹层形式出现于硅质泥页岩当中,多见于五峰组凯迪阶中上部和龙马溪组鲁丹阶下部。

3.1.5 介壳泥灰岩

五峰组-龙马溪组介壳灰岩主要出现在赫南特阶上部观音桥段,为一套厚度在4~20 cm的灰色富含赫南特贝化石泥灰岩,代表着海平面下降至最浅时期的沉积产物(图3e,图4g)。由于有机质含量较低,厚度薄,它不能成为有效的天然气储层,但它的存在表明五峰组与龙马溪组黑色页岩中通常没有明显的沉积间

断,因而也是用于区域地层对比的重要标志。

3.1.6 斑脱岩

该岩相是由火山喷发产生的火山灰等物质经过沉积成岩和蚀变作用后形成的一种特殊的灰白色粘土岩类,以粘土矿物为主(图3f,图4h)。它具有密度小、分布广、厚度薄的特征,属于事件性沉积产物,因此也是一种十分有效的高精度地层对比标志^[27]。在研究区,该岩相主要发育五峰组和龙马溪组下部,厚度多在0.1~2 cm,页理常极为发育(图3f)。由于总体厚度太薄,有机质含量过低,同样不能成为有效的页岩气储层,但它的发育频次和规模可直接反映当时的构造活动强度。

3.2 矿物组分特征

页岩矿物组分是表征页岩储层特征的重要参数,其脆性矿物含量直接决定了储层后期改造的可压裂性能^[6,24,28]。通过对宜昌地区五个剖面的五峰组-龙马溪组下部黑色页岩层段41块样品进行全岩矿物X衍射分析发现,石英和粘土矿物是泥页岩中最主要的矿物组分,其中石英含量变化较大,在18.26%~100%,平均为53.57%;长石含量在0~18.13%,平均为7.62%;粘土矿物含量在0%~75.13%,平均为35.01%;碳酸盐矿物含量较低,仅在部分样品可见白云石和方解石,通常在0.65%~8.13%。通过分层统计发现,宜昌地区五峰组-龙马溪组黑色岩系主要矿物的含量纵向上呈现一定的规律性(表1),凯迪阶五峰组硅质含量34.56%~100%,平均为73.54%,脆性矿物含量在45.16%~100%,平均为79.67%;赫南特阶硅质含量42.5%~86.01%,平均为68.43%,脆性矿物含量在58.48%~90.18%,平均为80.14%;鲁丹阶硅质含量44.45%~93.78%,平均为72.26%,脆性矿物含量在50.21%~98.73%,平均为81.03%,埃隆阶龙马溪组硅质含量18.26%~68.83%,平均为40.41%,脆性矿物含量在22.87%~81.02%,平均为53.10%。总体上表现为自下而上硅质含量呈现逐渐减少的旋回性特征,粘土矿物含量呈现逐渐增多,脆性矿物含量逐渐减少。

与四川盆地相比,研究区五峰组-龙马溪组下部黑色岩系矿物特征具有一定的差异性,主要表现为凯迪阶与鲁丹阶的硅质岩石石英矿物含量高于焦石坝地区的55.80%^[6],且在研究区内可见大量硅岩。资料显示这些硅质岩石内的石英来源较为广泛,除了以陆源碎屑供给和后期成岩形成次生石英矿物外,还可见

表 1 宜昌地区五峰组 – 龙马溪组黑色页岩层系主要矿物分布特征

Table 1 Mineral composition of the black shale from Wufeng-Longmaxi Formations in Yichang area

地层			矿物含量/%			
			石英	长石	碳酸盐矿物	粘土矿物
			最小~最大	最小~最大	最小~最大	最小~最大
			平均	平均	平均	平均
下志留统	龙马溪组	埃隆阶	18.26 ~ 68.83	3.14 ~ 18.13	0 ~ 16.19	7.54 ~ 75.13
			40.41	7.62	3.23	45.84
		鲁丹阶	44.45 ~ 93.78	1.74 ~ 15.6	0 ~ 5.46	0 ~ 46.28
			72.26	8.43	1.43	18.31
上奥陶统	五峰组	赫南特阶	42.5 ~ 86.01	4.17 ~ 11.85	0 ~ 8.13	9.82 ~ 32.67
			68.43	7.79	2.25	20.45
		凯迪阶	34.56 ~ 100	0 ~ 11.62	0 ~ 4.28	0 ~ 53.12
			73.54	5.74	1.56	19.46

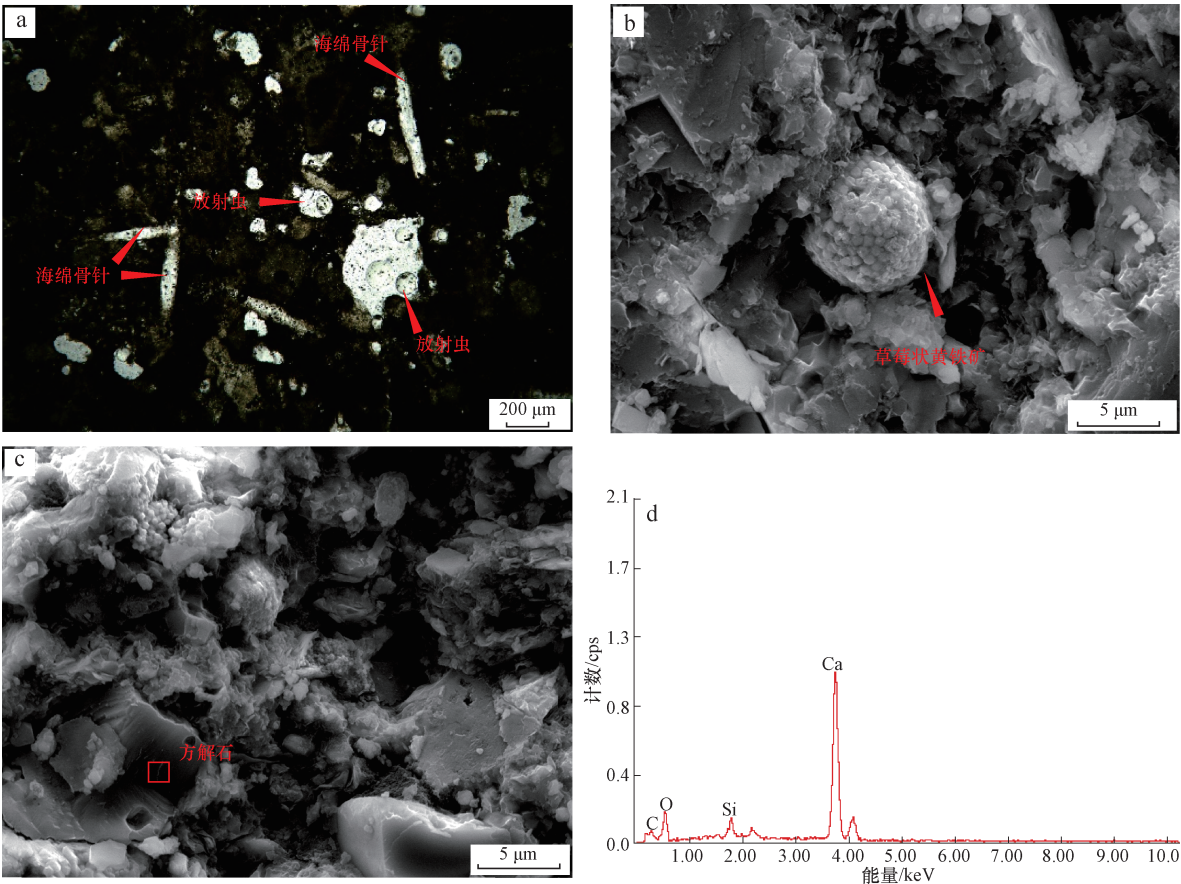


图 5 宜昌地区五峰组 – 龙马溪组黑色岩系典型矿物特征

Fig. 5 Mineral characteristics of the black shale from Wufeng-Longmaxi Formations in Yichang area

a. 硅质放射虫与海绵骨针,五峰组,黄花丁家坡剖面;b. 草莓状黄铁矿,埋深 1 450.16 m,五峰组,鄂宜页 3 井;c. 组间间隙中的方解石,1 447.23 m,龙马溪组,鄂宜页 3 井;d. 图 c 中方解石能谱显示,埋深 1 447.23 m,龙马溪组,鄂宜页 3 井

大量的生物成因硅,以发育硅质放射虫与海绵骨针为特征(图 5a),部分含量超过 75%。此外,研究区岩石中黄铁矿含量较低但较为常见,除了以成岩期形成的团块状黄铁矿外,镜下还可见到草莓状黄铁矿(图 5b),反映较强的还原环境。另外,碳酸盐矿物含量比

焦石坝地区更少(图 5c,d),且主要存在于微裂缝中。

3.3 有机地化特征

有机质类型是决定富有机质泥页岩生烃潜力的重要参数。前人研究显示,鄂西地区五峰组 – 龙马溪组干

酪根普遍具有 I - II₁ 型的特征,泥页岩干酪根干酪根同位素在 -32.04‰ ~ 27.62‰,平均为 ~30.84‰^[29]。有机显微组分以腐泥组为主,含量普遍大于 70%,镜质组含量一般在 13% ~ 36%,表明研究区五峰组 - 龙马溪组黑色页岩具有较好的生烃物质条件。

生烃物质的多少取决于有机质丰度,它不仅影响源岩生烃潜力的评价,同时也影响页岩的吸附气量。通过对研究区两口钻井及 4 个野外剖面共 64 个样品的 TOC 进行测定分析,发现五峰组 - 龙马溪组下部黑色页岩层段的有机碳含量最大为 6.38%,最小为 0.32%,平均为 2.47%,其中大于 2% 占比 60.94%,这表明宜昌地区五峰组 - 龙马溪组黑色岩系整体有机碳丰度高,与焦石坝地区五峰组 - 龙马溪组相当,具备良好的生烃物质基础(表 2)。

表 2 宜昌地区五峰组 - 龙马溪组黑色岩系 TOC 含量
Table 2 TOC of the black shale from Wufeng-Longmaxi Formations in Yichang area

剖面位置	层位	样品 个数	地层 TOC/%	
			分布范围	平均值
鄂宜页 2 井	五峰组 - 龙马溪组	30	0.32 ~ 5.53	2.41
鄂宜页 3 井	五峰组 - 龙马溪组	16	0.36 ~ 5.13	2.15
荷花横石	龙马溪组	18	0.93 ~ 6.38	2.90

另外,纵向上五峰组 - 龙马溪组黑色岩系有机碳含量具有逐渐减小的特征,各个阶所对应的 TOC 变化呈现一定的规律性(图 6)。凯迪阶所对应的有机碳含量在 0.93% ~ 5.13%,平均为 3.10%,主峰值在 2% ~ 4%,大于 2% 的样品占样品总数的 90%;赫南特阶黑色页岩有机碳含量为 1.28% ~ 5.52%,平均为 3.89%,大于 2% 的样品占比 70%;鲁丹阶有机碳含量在 1.76% ~ 6.38%,平均为 3.62%,主峰值 3% ~ 4%,有机碳含量大于 2% 的样品占样品总数的 89%;埃隆阶有机碳含量明显减少,在 0.32% ~ 2.92%,平均为 1.41%,有机碳含量大于 2% 的样品占样品总数的 34%。可以看出,就有机碳含量而言,无论是最大值还是平均值,凯迪阶至鲁丹阶对应的黑色页岩有机质丰度最高,埃隆阶有机碳含量明显降低(图 6)。

尽管人们对页岩气勘探潜力评价中有机质成熟度高低所产生的各种影响还没有明确的一致性认识,但统计分析发现,基本上所有产页岩气区的富有机质页岩镜质体反射率普遍都小于 3%^[7-10]。鄂宜页 2 井黑色页岩段最高热解峰温 $T_{\max}$ 在 448 ~ 600℃,平均为 514℃,采用沥青反射率换算得出镜质体反射率(R_o)整体较高,介于 2.0% ~ 3.2%,平均为 2.6%。这表明五峰组 - 龙马溪组有机质已处于过成熟阶段,形成的

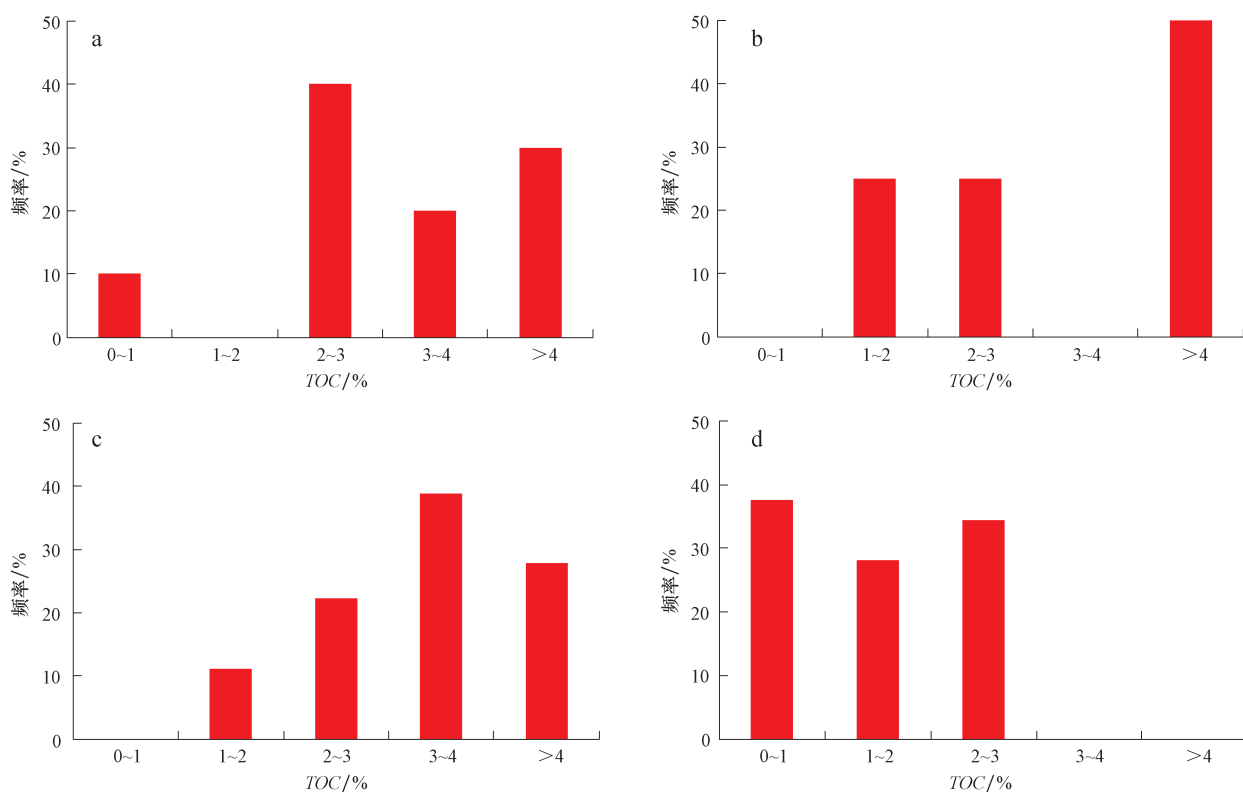


图 6 宜昌地区五峰组 - 龙马溪组黑色岩系各阶 TOC 分布特征

Fig. 6 TOC distribution of the black shale from different members of Wufeng-Longmaxi Formations in Yichang area

a. 凯迪阶 TOC 分布特征; b. 赫南特阶 TOC 分布特征; c. 鲁丹阶 TOC 分布特征; d. 埃隆阶 TOC 分布特征

天然气组分以甲烷为主,但其成熟度仍在有利区间范围内。此外,由于研究区处于隆起与盆地之间斜坡转换带,五峰组-龙马溪组黑色页岩埋深向东具有逐渐加深的趋势,因此 R_o 值向盆地方向也应逐渐增大。

3.4 储集空间及物性特征

3.4.1 储集空间类型

储集空间的发育是页岩气富集成藏的基础,孔隙度大小直接影响着页岩气的游离气和吸附气量^[30]。通过对岩心及野外剖面样品进行镜下鉴定和扫描电镜分析发现,研究区页岩中的储集空间以次生空隙为主,原生空隙由于压实作用多已经被破坏。根据储集空间形态及形成的物质组分,可将研究区五峰组-龙马溪组黑色页岩储层的储集空间划分为三大类,分别是有机质孔、无机质孔和微裂缝。

1) 有机质孔

有机质孔主要是指有机质在热演化过程中释放烃类物质后,由于收缩作用而在其内部形成的次生空隙^[31],也包括一些与生物化石有关的原生和次生溶蚀孔隙。研究区五峰组-龙马溪组收缩形成的有机质孔往往以蜂窝状分布于有机质内部,多呈现圆形、三角形或不规则形态,孔隙直径普遍较小,一般小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ (图7a)。由于有机质本身的非均质性,有机质孔隙的发育没有规律性,扫描电镜下显示为不均一的分布于有机质表面。尽管这类有机质孔隙直径小,但由于这些有机质孔隙多密集发育,单个有机质上可能发育多达数十或数百个(图7b),而且研究区五峰组-龙马溪组有机碳含量高,最终可以实现有机质孔隙度由量变到质变。与生物化石有关的有机质孔隙主要是一些海绵骨针或硅质放射虫的原生内部孔隙或它们的骨架被溶蚀后形成的次生孔隙,此类孔隙直径一般在 $10\sim 100\text{ }\mu\text{m}$,普通显微镜下即可见到不规则溶蚀孔隙边缘(图7c)。

2) 无机质孔

扫描电镜分析显示,研究区无机质孔主要包括残余粒间孔、晶间孔、溶蚀孔和铸模孔等,孔隙直径变化大,在 $10\text{ nm}\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 。残余粒间孔主要是一些不同矿物颗粒之间保留的原生孔隙,孔隙形态不规则,由于五峰组-龙马溪组经历过深埋和较强的压实作用,这些孔隙极少发育。晶间孔主要出现在伊利石、白云石以及黄铁矿等晶体间,孔隙直径较小,一般小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ (图7d,7e)。无机溶蚀孔非常普遍,可见不规则边缘,部分孔隙处于被石英充填或半充填状态,孔隙直径多大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ (图7f,7g)。铸模孔主要是一些晶体遭受溶蚀形成的孔隙,可见到明显的晶体边缘结构(7h),镜

下还可见到大量的黄铁矿脱落所形成的蜂窝状孔隙(图7f)。总体而言,无机质孔隙与有机质相比,分布分散,孔隙直径偏大。

3) 微裂缝

在宜昌五峰组-龙马溪组岩心观察和野外地质调查中,发现了大量的裂缝,包括低角度缝或高角度的裂缝。通过显微镜鉴定和扫描电镜分析,这些黑色岩系中主要有构造缝和层间缝两类。其中,构造微裂缝主要出现在硅质含量较高的泥页岩中,局部可见多期裂缝相互切割的特征(图8a),与层面斜交(图8b),裂缝宽度一般在 $10\sim 100\text{ }\mu\text{m}$,多被方解石、石英或有机质充填,部分裂缝受溶蚀作用改造明显,扫描电镜下裂缝似串珠状宽窄不一(图8c)。层间缝在研究区也较发育,主要是由于岩石组分的差异在两个岩层之间形成的纹层间隙,如伊利石与伊蒙混层或绿泥石之间形成微缝隙(图8d)。这些裂缝的存在,不仅增加了储集空间,同时通过压裂改造还能显著改善页岩的渗流能力。

3.4.2 储层物性特征

通过统计五峰组-龙马溪组钻井岩心的孔渗数据,黑色页岩层系孔隙度分布在 $0.9\%\sim 8.8\%$,平均为 3.8% ,其中孔隙度在 $4\%\sim 8\%$ 的样品占比 41% ;渗透率在 $0.0003\times 10^{-3}\sim 1.28\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,平均为 $0.19\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,其中渗透率在 $0.001\times 10^{-3}\sim 1\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 的样品占比 67% ,整体上呈现低孔、特低渗特征(图9)。孔隙度和渗透率之间相关性较差,表明富有机质页岩中的存在较多的孤立微孔隙和微裂缝,以至于出现部分高孔低渗或低孔高渗特征。

3.4.3 储层孔隙结构

压汞与氮气联合吸附分析实验表明,五峰组-龙马溪组黑色页岩孔隙直径分布范围较大,小孔径和大孔径孔隙均较为发育,具有典型的两头高、中间低的特点(图10)。来自宜页2井的测试数据显示,五峰组硅质泥页岩中小于 100 nm 的孔隙约占总孔隙的 51.78% ,其中小于 25 nm 的孔隙占比 39.96% ,孔隙直径在 $100\sim 2500\text{ nm}$ 的孔隙占比仅 17.27% ,而孔隙直径大于 2500 nm 的占比为 31.94% 。龙马溪组黑色炭质泥页岩同样具有相似的特征,其小于 100 nm 的孔隙约占总孔隙的 37.77% ,孔隙直径在 $100\sim 2500\text{ nm}$ 的孔隙占比仅 19.90% ,而孔隙直径大于 2500 nm 的占比高达 42.33% (图10)。这一特征表明,研究区五峰组-龙马溪组页岩孔隙主要由有机质纳米孔和溶蚀作用形成的微米孔组成。

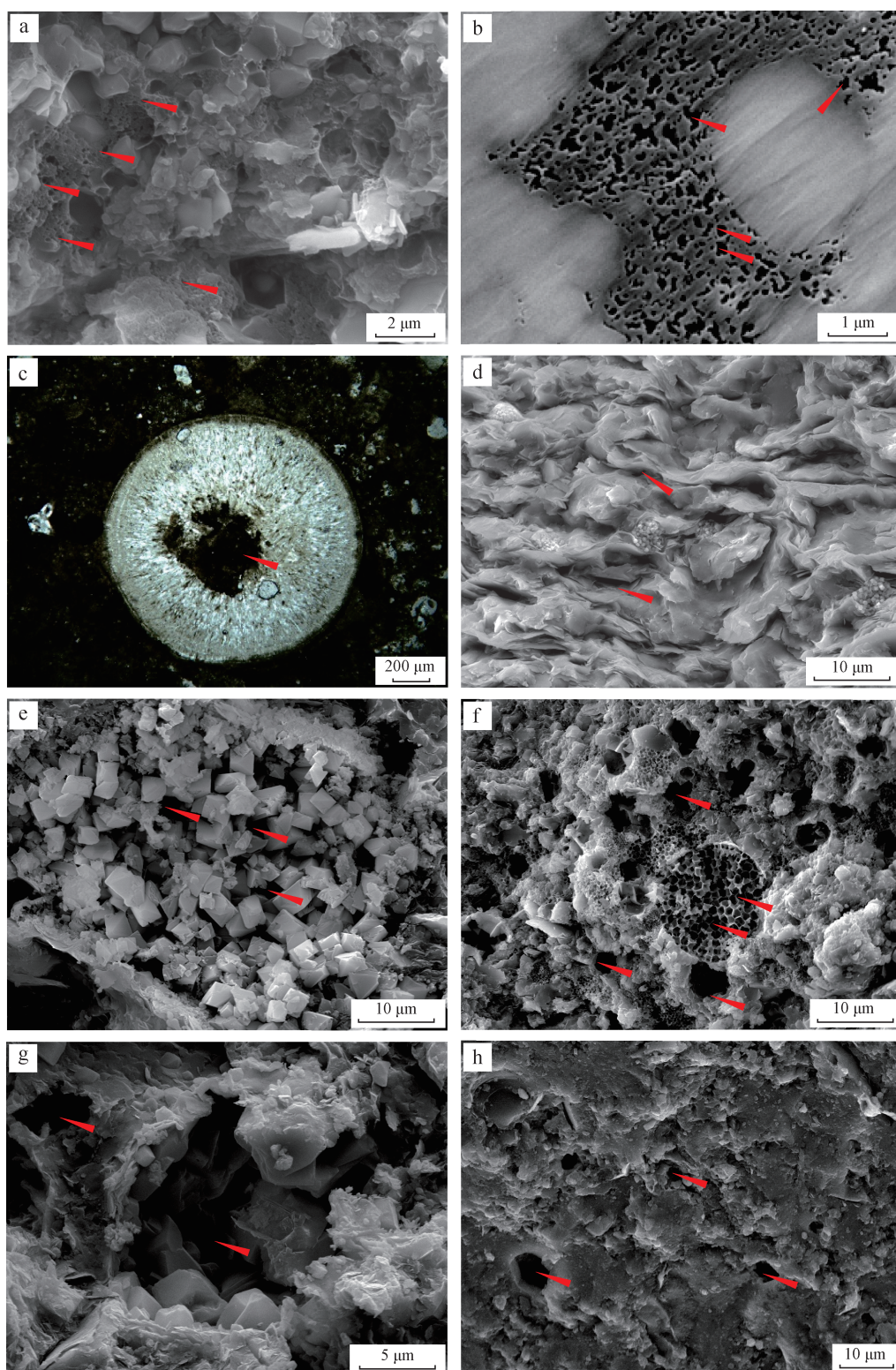


图7 宜昌地区五峰组-龙马溪组黑色岩系扫描电镜下孔隙类型及特征

Fig. 7 Pore types and characteristics of the black shale under SEM from Wufeng-Longmaxi Formations in Yichang area
a. 有机质孔隙与铸模孔,埋深1 446 m,龙马溪组,鄂宜页3井;b. 有机质表面密集分布的有机质孔,五峰组,黄花丁家坡剖面;c.
硅质放射虫,部分被溶蚀形成有机质溶孔,五峰组,黄花丁家坡剖面;d. 伊利石晶间孔缝,埋深1 417.16 m,龙马溪组,鄂宜页3
井;e. 黄铁矿晶体间孔隙,龙马溪组,荷花横石剖面;f. 溶蚀孔大量发育,还可见黄铁矿脱落后形成的蜂窝状铸模孔,龙马溪组,荷
花横石剖面;g. 溶蚀孔隙被石英半充填,五峰组,分乡王家湾剖面;h. 具规则边缘的铸模孔,五峰组,分乡王家湾剖面;
红色箭头指示孔隙发育位置

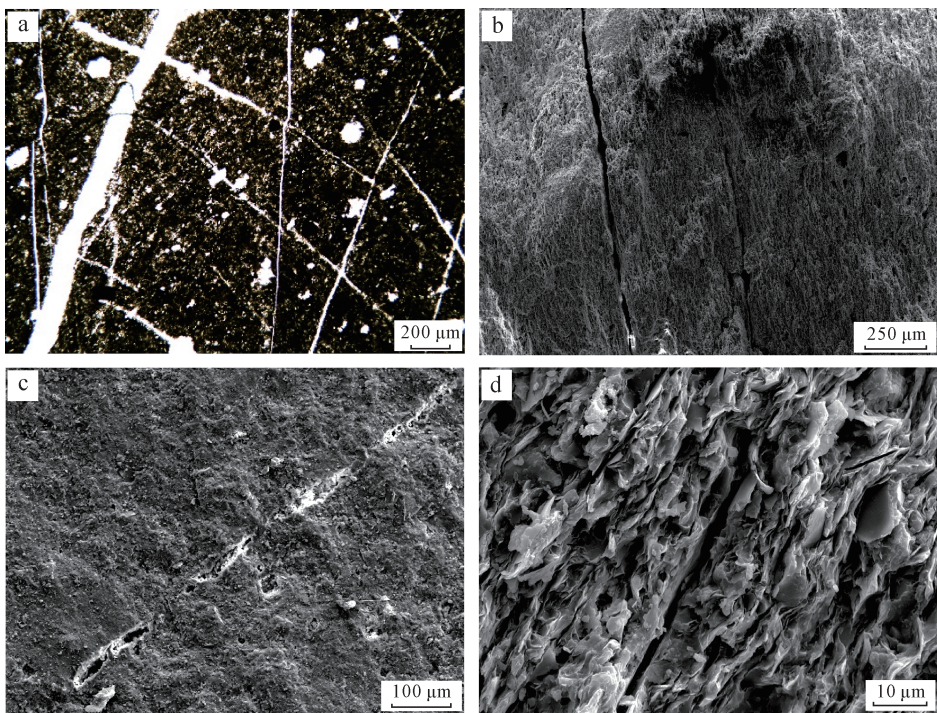


图 8 宜昌地区五峰组 - 龙马溪组黑色岩系微裂缝发育特征

Fig. 8 Micro-fracture characteristics of the black shale from Wufeng-Longmaxi Formations in Yichang area

a. 硅质岩, 多期裂缝大量发育, 被石英充填, 五峰组, 正交偏光, 荷花窑河剖面; b. 微裂缝切割层面, 五峰组, 扫描电镜照片, 黄花丁家坡剖面; c. 不均一溶蚀裂缝, 呈串珠状, 五峰组, 扫描电镜照片, 分乡王家湾剖面; d. 伊利石与伊蒙混层叠置形成顺层缝, 龙马溪组, 扫描电镜照片, 荷花横石剖面

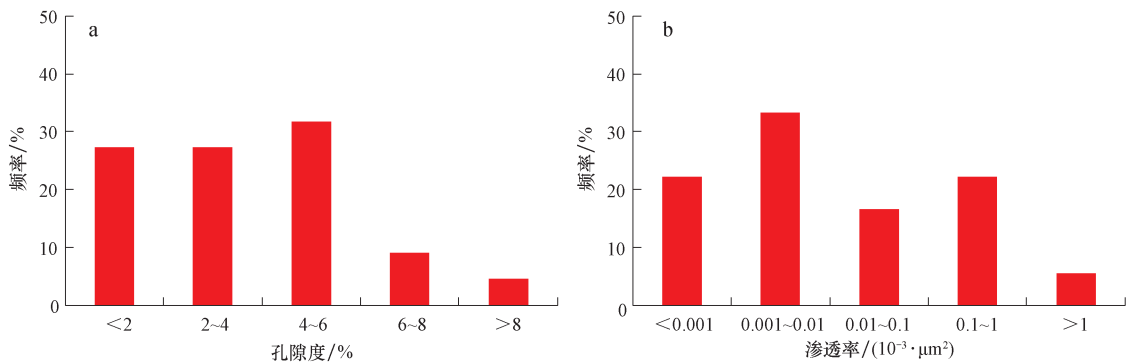


图 9 宜昌地区五峰组 - 龙马溪组黑色岩系储层物性特征

Fig. 9 Physical properties of the black shale from Wufeng-Longmaxi Formations in Yichang area

a. 五峰组 - 龙马溪组黑色岩系孔隙度特征; b. 五峰组 - 龙马溪组黑色岩系渗透率特征

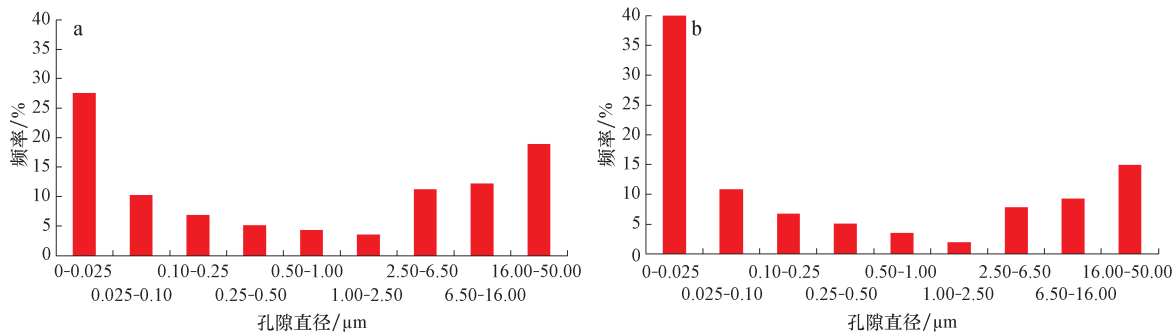


图 10 宜昌地区五峰组 - 龙马溪组页岩储层孔隙结构特征

Fig. 10 Pore structures of the black shale from Wufeng-Longmaxi Formations in Yichang area

a. 龙马溪组黑色页岩孔隙结构特征; b. 五峰组黑色典型孔隙结构特征

3.5 含气性特征

通过对宜昌地区鄂宜页2井进行现场解析发现,五峰组-龙马溪组页岩含气量在 $0.068 \sim 3.33 \text{ m}^3/\text{t}$,其中下部黑色页岩层段含气丰度较高,总含气量为 $0.67 \sim 3.33 \text{ m}^3/\text{t}$,平均为 $1.85 \text{ m}^3/\text{t}$ 。由下至上,黑色页岩段含气量呈现逐渐增加的趋势(图11)。在不考虑 83°C 高温快速解吸后的残余气含量,采用前1h的解吸气数据对损失气量进行恢复发现,黑色页岩段损失气量为 $0.33 \sim 2.31 \text{ m}^3/\text{t}$,平均为 $1.12 \text{ m}^3/\text{t}$;解吸气为 $0.13 \sim 1.16 \text{ m}^3/\text{t}$,平均为 $0.62 \text{ m}^3/\text{t}$ 。纵向上,损失气量普遍大于解吸气量,且损失气占比在黑色页岩层系的底部更为明显(图11)。这一方面可能是由于含气量的增加导致,另一方面可能是由于下部孔隙和岩石裂缝更为发育,使得大量的游离气体在岩心密闭之前就已经散失。

除该井之外,在研究区周缘部署的其它钻井也获得了良好显示,如荆102井黑色页岩层段总含气量为 $3.1 \sim 3.6 \text{ m}^3/\text{t}$,平均为 $3.3 \text{ m}^3/\text{t}$;宜地1井目的层总含气量为 $1.3 \sim 3.7 \text{ m}^3/\text{t}$,平均为 $2.3 \text{ m}^3/\text{t}$;远地1井目的层含气量平均为 $1.9 \text{ m}^3/\text{t}$ 。尽管这些数值还无法与焦石坝地区的高含气量值相比,但这些数据足以说明宜昌地区五峰组-龙马溪组黑色页岩含气性较好,具有良好的勘探价值。

4 优质储层分布

4.1 储层评价标准

广义的说,所有含有机质的页岩在经过埋藏热演

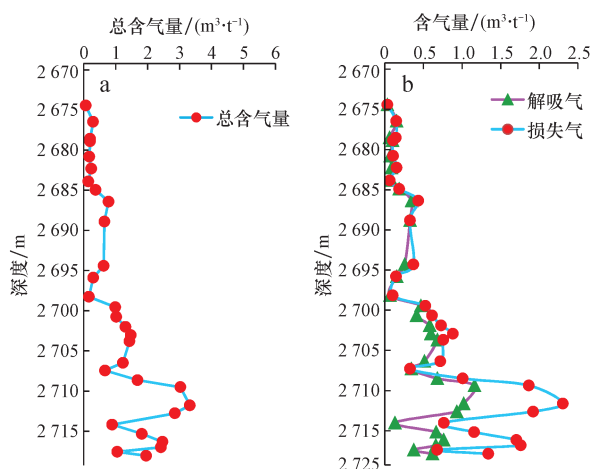


图11 宜昌地区宜页2井五峰组-龙马溪组黑色页岩层段现场解吸气含量变化特征

Fig. 11 Variation of desorbed gas content of the black shale from Wufeng-Longmaxi Formations in Well Yy2, Yichang area
a. 不同深度页岩总含气量特征; b. 不同深度页岩气总量构成特征

化后都能够成为页岩气储层,但对于页岩气勘探而言,只有那些达到一定条件的页岩储层才是优质储层,才能满足勘探商业价值。因此识别哪些是“甜点”储层至关重要,而最关键的就是建立一个符合地区实际情况的储层评价标准。

前人通过对四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气储层的含气性与储层其它参数之间的相关性进行分析发现,在有机质主体成熟度为 $2\% \sim 3\%$ 时,有机碳含量和脆性矿物含量是储层评价中非常关键的两个参数^[32,33]。有机碳含量大于 2.5% ,页岩含气量会显著增加,这与宜昌地区极为相似,有机碳含量大于 2.5% 的黑色页岩段总含气量普遍大于 $1.5 \text{ m}^3/\text{t}$ (图12)。脆性矿物含量的增加尽管不能带来孔隙度的增加,但是和含气量关系明显,并且鉴于页岩普遍地低孔低渗透性和压裂的必要性,脆性矿物含量的增加也会有利于后期储层改造。针对这一规律性认识和客观对比分析需要,本文结合前人研究成果并参考四川盆地五峰组-龙马溪组页岩储层品质参数建立了宜昌地区五峰组-龙马溪组页岩气储层评价标准(表3)。

4.2 优质储层分布

根据上述储层评价参数,结合储层特征对鄂宜页2井页岩储层进行精细刻画后认为,该宜昌地区五峰组-龙马溪组黑色富有机质页岩储层非均质性较强,不同品质储层间隔分布(图12)。储层类型垂向上逐渐变差,由I类过渡为IV类。优质储层集中在五峰组中上部和龙马溪组底部,主要对应于凯迪阶WF2-WF3笔石带以及鲁丹阶LM2-LM3笔石带(LM4笔石带缺失),储层岩石类型以形成于深水硅质陆棚的硅岩和硅质泥页岩为主,厚度约11 m,且该优质储层段的页岩气含气量平均大于 $2.3 \text{ m}^3/\text{t}$ 。储层品质的纵向分

表3 鄂西宜昌地区五峰组-龙马溪组页岩储层品质分级评价参数

Table 3 Reservoir parameters for grading evaluation of Wufeng-Longmaxi Formations in Yichang area, western Hubei Province

储层品质	TOC/%	脆性指数/%	含气性/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	沉积环境
I类(优质储层)	>2.5	>50	>2	深水硅质陆棚
II类(次优储层)	1.5 ~ 2.5	40 ~ 50	1 ~ 2	深水泥质陆棚
III类(差储层)	0.5 ~ 1.5	30 ~ 40	0.5 ~ 1	深/浅水泥质陆棚
IV类(非储层)	<0.5	<30	<0.5	浅水泥质陆棚

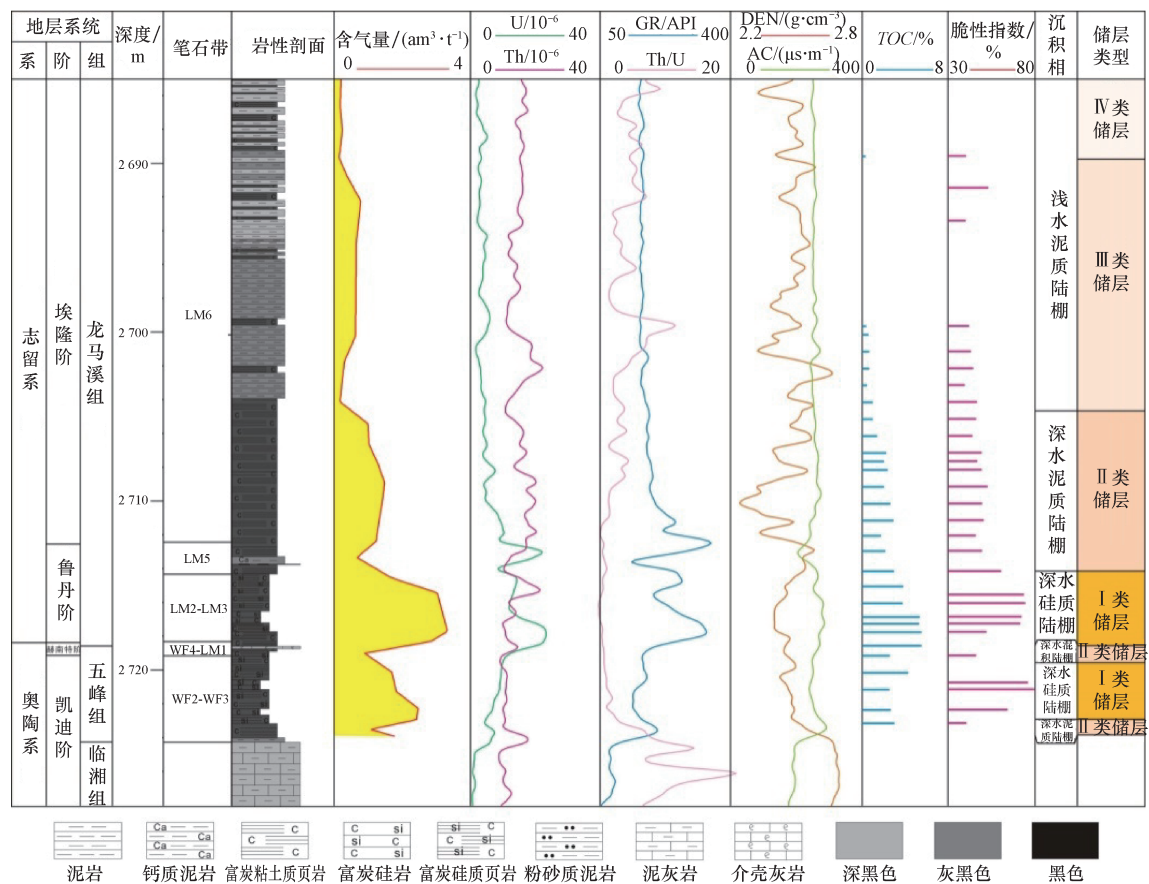


图 12 宜昌地区宜页 2 井五峰组 – 龙马溪组黑色富有机质页岩层段储层综合评价

Fig. 12 Reservoir evaluation of organic-rich black shale from Wufeng-Longmaxi Formations in Well Yy2, Yichang area

布和泥页岩沉积环境演化相一致,深水陆棚相是优质储层发育的最有利相带(图 12)。

五峰组 – 龙马溪组底部黑色页岩段沉积期,鄂西地区受广西运动影响明显,在长阳以南、恩施、龙山、五峰、松滋一带形成了较大规模的湘鄂西水下隆起,造成笔石带和黑色富有机质页岩地层缺失^[2,19],但在长阳以北的龙泉、黄花、分乡、远安等地笔石序列基本完整,整体以深水陆棚沉积环境为主^[5,20],黑色页岩厚度稳定,TOC 大于 2%的页岩厚度普遍在 19 ~ 22 m,且硅质含量普遍均大于 40%。因此,整个黄陵背斜东部的宜昌斜坡区均具有形成优质页岩储层的沉积地质条件。

5 页岩气勘探潜力

尽管与重庆涪陵、四川长宁 – 威远相比,鄂西宜昌地区五峰组 – 龙马溪组优质页岩储层厚度相对较薄^[3,6],但整个黑色富有机质页岩层段平均厚度也达 20 m 左右,其所对应的 TOC 均大于 2%,最高值部分可达 6%,足以形成具有工业气流的烃源岩基础(图 2,图 12)。此外,较高的石英矿物含量,普遍大于 40%的

脆性矿物指数也有助于水平压裂工程的实施^[34],而且鄂宜页 2 井已经获得了页岩气工业气流,表明鄂西宜昌地区五峰组 – 龙马溪组黑色页岩储层具有一定的勘探潜力。然而,页岩气的勘探潜力评价不仅包括先天要素,同时也要考虑后期的改造和经济技术条件,主要体现在页岩气保存条件以及埋深和资源量等方面。

5.1 保存条件

良好的保存条件是页岩气富集成藏的关键。南方五峰组 – 龙马溪组页岩气储层基本上都经历了多期构造活动,绝大部分地区由于受到强烈构造作用的叠加破坏,页岩气已散失殆尽^[8,11]。由于鄂西宜昌地区毗邻黄陵古隆起,花岗岩的刚性基底对斜坡区起到了明显的保护作用^[11,13],以至于斜坡区黑色页岩储层以整体性上下运动为主^[16],避免了强烈挤压构造作用的叠加破坏,储层内部断层发育较少,即使存在小规模逆断层,由于强烈的挤压也可以形成侧向封堵(图 13)。另外,顶底板条件方面,研究区五峰组底部为致密的上奥陶统宝塔组 – 临湘组泥灰岩,厚度大于 20 m,分布稳定;黑色页岩顶部不仅发育厚层且致密的志留系灰

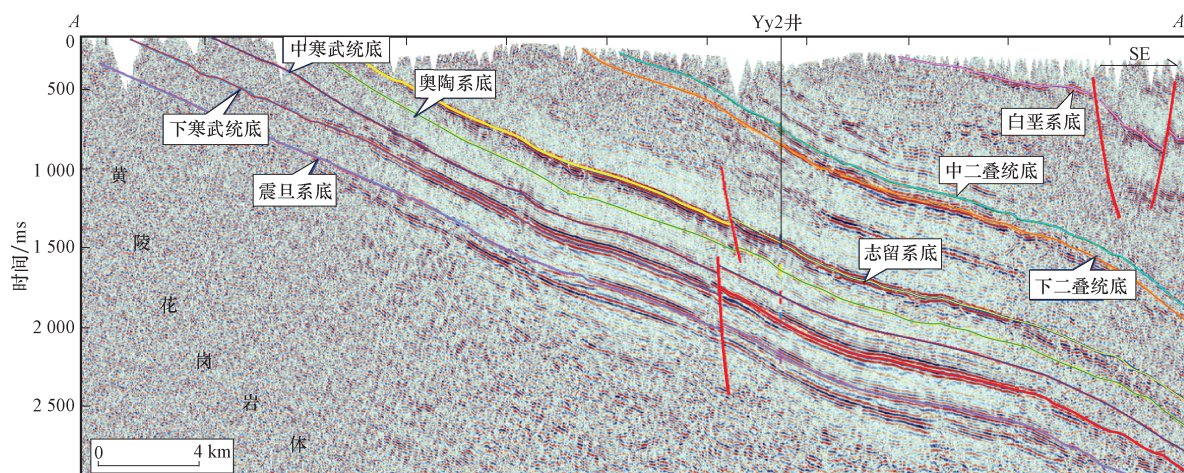


图 13 宜昌地区过宜页 2 井二维地震剖面(2015HY-Z2)响应特征(剖面位置见图 1)

Fig. 13 2-D seismic cross-section through Well Yy2, Yichang area (see Fig. 1 for its specific location)

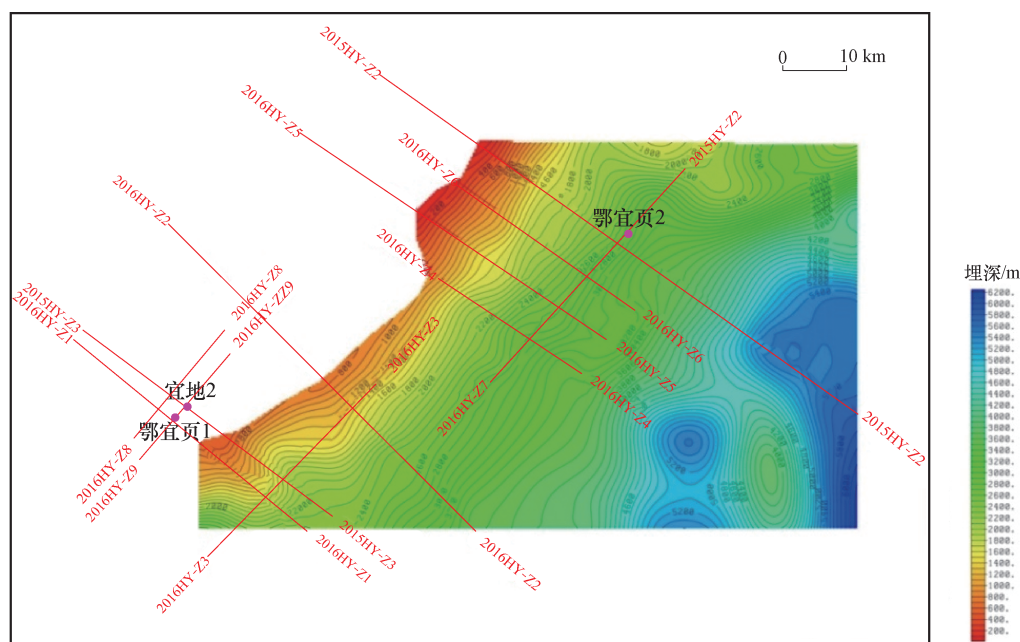


图 14 宜昌地区宜页 2 井区志留系底界埋深特征

Fig. 14 Burial depth of the Silurian bottom boundary in Well Yy2, Yichang area

色或黄绿色泥页岩,同时还覆盖了上千米厚的二叠系灰岩至白垩系碎屑岩(图 13)。因此,相对于鄂西其它断裂发育区和构造挤压变形强烈地带,黄陵背斜东部的宜昌斜坡区保存条件相对较好,属于页岩气构造保存有利区。

5.2 埋藏条件

利用二维地震并结合钻井资料对宜页 2 井区志留系底界面进行刻画发现,黄陵隆起的持续上升使得宜昌东北部成为了一单斜构造,避免了其奥陶系五峰组-志留系龙马溪组黑色页岩层系的深埋过大(图 13,图 14)。总体上由西向东该区志留系埋深呈现逐

渐增大的趋势,基本上介于 0~4 000 m,而靠近江汉盆地的当阳复向斜最大埋深超过 6 000 m(图 14)。就现今的经济技术条件而言,埋藏深度在 1 500~4 500 m 的页岩气才具有较好的勘探开发价值,而这一深度范围恰好主要集中于宜昌分乡-龙泉和远安一带(图 1),区域总面积超过 1 200 km²。适中的埋深加上较大的富有机质页岩分布面积为页岩气的勘探开发提供了有利条件。

5.3 资源潜力

根据五峰组-龙马溪组黑色页岩层系相关参数区域平均值,如储层厚度(平均为 20 m)、含气量(平均为

2.0 m³/t)、岩石密度(平均为 2.50 g/cm³)进行体积法估算,整个宜昌斜坡区五峰组-龙马溪组页岩气地质资源量超过 1 200 × 10⁸ m³,具备一定的页岩气勘探潜力。由此可见,沿黄陵背斜东缘宜昌向北至远安等地,由于在奥陶纪-志留纪之交具有相似的沉积环境且后期构造背景相同,应均具有良好的勘探前景,进一步加大上述相关区域的五峰组-龙马溪组页岩气勘探有助于在我国南方形成新的页岩气资源接替基地。

6 结论

1) 鄂西宜昌地区五峰组-龙马溪组黑色富有机质页岩厚度一般在 20 m 左右,储层岩石类型丰富,以硅质泥/页岩为主,脆性矿物含量丰富,局部可见生物成因硅岩;储层有机碳含量高,平均 TOC 含量为 2.47%,有机质类型以 I 型和 II₁ 型为主,有机质主体热演化程度高, R_o 普遍大于 2%, T_{max} 平均超过 500 °C,处于过成熟阶段;储层物性整体较差,属于低孔特低渗储层,储集空间大小分布具有典型的中间低、两头高的两极化分布特征,但富有机质储层含气性较好,平均含气量超过 2.0 m³/t。

2) 利用脆性矿物指数、有机碳含量并结合含气性及测井响应开展储层评价,认为宜昌地区五峰组-龙马溪组黑色富有机质页岩层段储层可划分为 4 类,其中优质储层和次优储层位于黑色页岩层系下部厚度约 11 m,对应于凯迪阶 WF2-WF3 笔石带和鲁丹阶 LM2-LM3 笔石带,较差储层和非储层对应于主要对应于龙马溪组黑色岩系上部,由下至上储层品质逐渐变差。

3) 尽管宜昌地区五峰组-龙马溪组黑色富有机质页岩储层厚度与四川盆地涪陵焦石坝相比较薄,但其有机碳含量同样较高,埋深适中,估算的地质资源量超过 1 200 × 10⁸ m³,并且鄂宜页 2 井已经取得了重大突破,表明鄂西黄陵背斜东部宜昌斜坡区五峰组-龙马溪组也具有较好的勘探前景,可作为除四川盆地之外新的页岩气勘探接替区。

参 考 文 献

- [1] Chen X, Rong JY, Li Y, et al. Facies Patterns and Geography of the Yangtze Region, South China, through the Ordovician and Silurian Transition [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 204(3): 353-372.
- [2] 陈旭,樊隽轩,张元动,等.五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J]. *地层学杂志*, 2015, 39(4): 351-358.
Chen Xu, Fan Junxuan, Zhang Yuandong, et al. Subdivision and delineation of the Wufeng and Lungmachi black shales in the Subsurface areas of the Yangtze Platform [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2015, 39(4): 351-358.
- [3] 王玉满,董大忠,李新景,等.四川盆地及其周缘下志留统龙马溪组层序与沉积特征[J]. *天然气工业*, 2015, 35(3): 12-21.
Wang Yuman, Dong Dazhong, Li Xinjing, et al. Stratigraphic sequence and sedimentary characteristics of Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its peripheral areas [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(3): 12-21.
- [4] 李艳芳,邵德勇,吕海刚,等.四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1470-1483.
Li Yanfang, Shao Deyong, Lv Haigang, et al. A relationship between elemental geochemical characteristics and organic matter enrichment in marine shale of Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2015, 36(12): 1470-1483.
- [5] 徐政语,蒋恕,熊绍云,等.扬子陆块下古生界页岩发育特征与沉积模式[J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 21-35.
Xu Zhenyu, Jiang Shu, Xiong Shaoyun, et al. Characteristics and depositional model of the Lower Paleozoic organic rich shale in the Yangtze Continental Block [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 21-35.
- [6] 王超,张柏桥,舒志国,等.四川盆地涪陵地区五峰组-龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(3): 485-497.
Wang Chao, Zhang Boqiao, Shu Zhiguo, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling area, the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(3): 485-497.
- [7] 郭彤楼,刘若冰.复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示——以四川盆地东部盆缘 JY1 井为例[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(4): 643-651.
Guo Tonglou, Liu Ruobing. Implications from marine shale gas exploration breakthrough in complicated structural area at high thermal stage: Taking Longmaxi Formation in Well JY1 as an Example [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(4): 643-651.
- [8] 郭旭升.南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. *地质学报*, 2014, 88(7): 1209-1218.
Guo, Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in Southern China——Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(7): 1209-1218.
- [9] 王志刚.涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 1-6.
Wang Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 1-6.
- [10] Nie Haikuan, Li Donghui, Liu Guangxiang, et al. An overview of the geology and production of the Fuling shale gas field, Sichuan Basin, China [J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(3-4): 147-164. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.06.005>.
- [11] 翟刚毅,王玉芳,包书景,等.我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测[J]. *地球科学*, 2017, 42(7): 1057-1068.
Zhai Gangyi, Wang Yufang, Bao Shujing, et al. Major factors control-

- ling the accumulation and high productivity of marine shale gas and prospect forecast in Southern China [J]. *Earth Science*, 2017, 42 (7): 1057–1068.
- [12] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践 [J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 561–574.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. China's shale gas exploration and development: understanding and practice [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 561–574.
- [13] 陈孝红, 张保民, 陈林, 等. 鄂西宜昌地区晚奥陶世—早志留世页岩气藏的主控地质因素与富集模式 [J]. *地球学报*, 2018, 39(3): 257–268.
Chen Xiaohong, Zhang Baomin, Chen Lin, et al. Main geological controlling factors and enrichment pattern of shale gas reservoirs in the Late Ordovician-early Silurian strata of Yichang, Western Hubei Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(3): 257–268.
- [14] 聂海宽, 张柏桥, 刘光祥, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气高产地质原因及启示——以涪陵页岩气田 JY6-2HF 为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 463–473.
Nie Haikuan, Zhang Baiqiao, Liu Guangxiang, et al. Geological factors contributing to high shale gas yield in the Wufeng—Longmaxi Fms of Sichuan Basin: A case study of Well JY6-2HF in Fuling shale gas field [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 463–473.
- [15] 李天义, 何生, 何治亮, 等. 中扬子地区当阳复向斜中生代以来的构造抬升和热史重建 [J]. *石油学报*, 2012, 33(02): 213–224.
Li Tianyi, He Shen, He Zhiliang, et al. Reconstruction of tectonic uplift and thermal history since Mesozoic in the Dangyang synclinorium of the central Yangtze area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 213–224.
- [16] 徐大良, 彭练红, 刘浩, 等. 黄陵背斜中生代多期次隆升的构造—沉积响应 [J]. *华南地质与矿产*, 2013, 29(2): 90–99.
Xu Daliang, Peng Lianhong, Liu Hao, et al. Meso-Cenozoic tectono-sedimentary response of multi-phased uplifts of Huangling anticline, Central China [J]. *Geology & Mineral Resources of South China*, 2013, 29(2): 90–99.
- [17] 邓铭哲, 何登发. 当阳地区地质结构及其对宜昌地区志留系页岩气勘探的意义 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(4): 487–500.
Deng Mingzhe, He Dengfa. The geological structure in the Dangyang area and its significance to the shale gas exploration in Yichang area, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2018, 45(4): 487–500.
- [18] 李志明, 全秋琦. 中国南部奥陶—志留纪笔石页岩相类型及其构造古地理 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1992, 17(3): 261–269.
Li Zhiming and Quan Qiuqi. Lithofacies Types and Tectonic Palaeogeography of Ordovician and Silurian Graptolite-Bearing Strata in South China [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1992, 17(3): 261–269.
- [19] 王桢, 戎嘉余, 詹仁斌, 等. 鄂西南奥陶系—志留系交界地层研究兼论宜昌上升 [J]. *地层学杂志*, 2013, 37(3): 264–274.
Wang Yi, Rong Jiayu, Zhan Renbin, et al. On the Ordovician-Silurian boundary strata in Southwestern Hubei, and the Yichang Uplift [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2013, 37(3): 264–274.
- [20] 严德天, 王清晨, 陈代钊, 等. 扬子及周缘地区上奥陶统一志留统烃源岩发育环境及其控制因素 [J]. *地质学报*, 2008, 82(3): 321–327.
Yan Detian, Wang Qingchen, Chen Daizhao, et al. Sedimentary environment and development controls of the hydrocarbon sources beds: the Upper Ordovician Wufeng Formation and the Lower Silurian Longmaxi Formation in the Yangtze Area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(3): 321–327.
- [21] 刘伟, 许效松, 余谦, 等. 中上扬子晚奥陶世赫南特期岩相古地理 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(1): 32–39.
Liu Wei, Xu Xiaosong, Yu Qian, et al. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician Hirnantian in the Middle-Upper Yangtze region of China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2012, 39(1): 32–39.
- [22] Fan J X, Melchin M J, Chen X, et al. Biostratigraphy and Geography of the Ordovician-Silurian Lungmachi Black Shales in South China [J]. *Sci China Earth Sci*, 2011, 54: 1854–1863.
- [23] 王涛利, 郝爱胜, 陈清, 等. 中扬子宜昌地区五峰组和龙马溪组页岩发育主控因素 [J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(5): 616–631.
Wang Taoli, Hao Aisheng, Chen Qing, et al. The study of main factors controlling the development of Wufeng Formation and Longmaxi Formation organic-rich shales in the Yichang area, middle Yangtze region [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(5): 616–631.
- [24] 邱小松, 杨波, 胡明毅. 中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(6): 1274–1283.
Qiu Xiaosong, Yang Bo, Hu Mingyi. Characteristics of shale reservoirs and gas content of Wufeng-Longmaxi Formation in the middle Yangtze Region [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(6): 1274–1283.
- [25] 王玉满, 王淑芳, 董大忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩岩相表征 [J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 119–133.
Wang Yuman, Wang Shufang, Dong Dazhong, et al. Lithofacies Characterization of Longmaxi Formation of the Lower Silurian, Southern Sichuan [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 119–133.
- [26] Gou Q, Xu S. Quantitative evaluation of free gas and adsorbed gas content of Wufeng-Longmaxi shales in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin, China [J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2019, 3(3): 258–267, doi:10.26804/ager.2019.03.04.
- [27] Su W B, He L Q, Wang Y B, et al. K-bentonite beds and high-resolution integrated stratigraphy of the uppermost Ordovician Wufeng and the Lowest Silurian Longmaxi Formations in South China [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 46(11): 1121–1133.
- [28] Li Yang, Zhou Dehua, Wang Weihong, et al. Development of unconventional gas and technologies adopted in China [J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(1–2): 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.04.004>.
- [29] 刘安, 包汉勇, 李海, 等. 湖北省上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气地质条件分析及有利区带预测 [J]. *华南地质与矿产*, 2016, 32(2): 126–134.
Liu An, Bao Hanyong, Li Hai, et al. Analysis of the shale gas geological conditions of the upper Ordovician Wufeng Formation-lower Silurian Longmaxi Formation in Hubei Province and predict the favorable

- Zone[J]. *Geology & Mineral Resources of South China*, 2016, 32(2): 126–134.
- [30] 余川, 聂海宽, 曾春林, 等. 四川盆地东部下古生界页岩储集空间特征及其对含气性的影响[J]. *地质学报*, 2014, 88(7): 1311–1320.
- Yu Chuan, Nie Haikuan, Zeng Chunlin, et al. Shale reservoir space characteristics and the effect on gas content in Lower Palaeozoic erathem of the Eastern Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(7): 1311–1320.
- [31] 马勇, 钟宁宁, 程礼军, 等. 渝东南两套富有机质页岩的孔隙结构特征——来自 FIB-SEM 的新启示[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(1): 109–116.
- Ma Yong, Zhong Ningning, Chen Lijun, et al. Pore structure of two organic-rich shales in southeastern Chongqing area: Insight from Focused Ion Beam Scanning Electron Microscope (FIB-SEM) [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(1): 109–116.
- [32] Zheng Herong, Zhang Jincai, Qi Yuanchang. Geology and geomechanics of hydraulic fracturing in the Marcellus shale gas play and their potential applications to the Fuling shale gas development[J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(1–2): 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.05.002>.
- [33] 涂乙, 邹海燕, 孟海平, 等. 页岩气评价标准与储层分类[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(1): 153–158.
- Tu Yi, Zou Haiyan, Meng Haiping, et al. Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(1): 153–158.
- [34] 张晓明, 石万忠, 徐清海, 等. 四川盆地焦石坝地区页岩气储层特征及控制因素[J]. *石油学报*, 2015, 36(8): 926–939+953.
- Zhang Xiaoming, Shi Wanzhong, Xu Qinghai, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of shale gas in Jiaoshiba Area, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(8): 926–939+953.

(编辑 董立)

(上接第106页)

- [20] 郭旭升, 胡东风, 魏祥峰, 等. 四川盆地焦石坝地区页岩裂缝主控因素及对产能的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(6): 799–808.
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wei Xiangfeng, et al. Main controlling factors on shale fractures and their influences on production capacity in Jiaoshiba area, the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 799–808.
- [21] Nie Haikuan, Li Donghui, Liu Guangxiang, et al. An overview of the geology and production of the Fuling shale gas field, Sichuan Basin, China[J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(3–4): 147–164. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.06.005>.
- [22] 邓继新, 唐郑元, 李越, 等. 成岩过程对五峰—龙马溪组页岩地震岩石物理特征的影响[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(2): 659–672.
- Deng Jixin, Tang Zhengyuan, Li Yue, et al. The influence of the diagenetic process on seismic rock physical properties of Wufeng and Longmaxi Formation shale[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(2): 659–672.
- [23] 张东晓, 杨婷云. 页岩气开发综述[J]. *石油学报*, 2013, 34(4): 792–801.
- Zhang Dongxiao & Yang Tingyun. An overview of shale-gas production[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(4): 792–801.
- [24] 杨洋. 川南长宁地区下志留统龙马溪组页岩储层研究[D]. 成都: 成都西南石油大学, 2016.
- Yang Yang. Study of Long Ma Xi Shale Reservoir Locating in Southern Sichuan Changning Area[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [25] 赵金洲, 沈聘, 任岚, 等. 页岩储层不同赋存状态气体含气量定量预测: 以四川盆地焦石坝页岩气田为例[J]. *天然气工业*, 2017, 37(4): 27–33.
- Zhao Jinzhou, Shen Cheng, Ren Lan, et al. Quantitative prediction of gas contents in different occurrence states of shale reservoirs: A case study of Jiaoshiba shale gasfield in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(4): 27–33.
- [26] 王玉满, 王淑芳, 董大忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩岩相表征[J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 119–133.
- Wang Yuman, Wang Shufang, Dong Dazhong, et al. Lithofacies characterization of Longmaxi Formation of the lower Silurian, southern Sichuan[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 119–133.
- [27] Zheng Herong, Zhang Jincai, Qi Yuanchang. Geology and geomechanics of hydraulic fracturing in the Marcellus shale gas play and their potential applications to the Fuling shale gas development[J]. *Energy Geoscience*. Volume 1, Issues 1–2, 2020, Pages 36–46. ISSN 2666–7592. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.05.002>.
- [28] 赵圣贤, 杨跃明, 张鉴, 等. 四川盆地志留统龙马溪组页岩小层划分与储层精细对比[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(3): 470–487.
- Zhao Shengxian, Yang Yueming, Zhang Jian, et al. Micro-layers division and fine reservoirs contrast of Lower Silurian Longmaxi Formation shale, Sichuan Basin, SW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(3): 470–487.
- [29] 赵金洲, 许文俊, 李勇明, 等. 页岩气储层可压性评价新方法[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(6): 1165–1172.
- Zhao Jinzhou, Xu Wenjun, Li Yongming, et al. A new method for fractability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(6): 1165–1172.
- [30] 谢军, 张浩森, 余朝毅, 等. 地质工程一体化在长宁国家级页岩气示范区中的实践[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(1): 21–28.
- Xie Jun, Zhang Haomiao, She Chaoyi, et al. Practice of geology-engineering integration in Changning State Shale Gas Demonstration Area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(1): 21–28.

(编辑 董立)